

## 方向特性を有する管路の残差流量評価に関する試み

九州大学大学院 学生員 川野 立・ Mukhsan Putra Hatta 正会員 藤田 和夫 フェロー 小松 利光

### 1. はじめに

近年、閉鎖性沿岸域において水質悪化が問題となっており、これに対して解決が望まれている。現状の対策としては、海水交換による水質改善手法である透過性構造物、砕波や渦制御型の防波堤などの適用例が多く報告されている。これらは、主に小規模な漁港などに適応され、すばらしい水質改善効果がみられているものもあり<sup>1)</sup>、場合によっては非常に有効な解決手段であることが示されている。しかしながら、これら従来から用いられている方法では広大な水域の水質改善を行うのは難しく、施工も大がかりで費用がかさむといった問題から適用に限界があり、入江や内湾といった地域では未だ有効な解決策がほとんどない状況にある。

これに対して筆者らは、非対称構造物を管内壁に取り付け、方向抵抗特性を持たせた管路 (以下 One Way Pipe という) による水質改善技術を提案している。One Way Pipe に波浪もしくは潮汐に起因するような往復流が作用すると、その方向特性から管路内に残差流が創出されるので、この残差流が海水交換の役目を果たし水質の改善が行われる。さらに、One Way Pipe を海底に連続して設置すると、残差流の鉛直循環もまた連続して生成されるため、平面スケールに左右されることなく広域的な場の海水交換が可能であると考えられる。本稿では、この One Way Pipe の水質改善効果を評価することを目指して、残差流量を実験と管路の基礎式を通じて定量的に評価することを試みる。

### 2. 実験および計算方法

まず、Fig. 1 に示す二次元造波水槽において、造波装置から 700 cm の地点に、管径  $d = 10 \times 10$  cm、長さ  $l = 50$  cm のアクリル製矩形管に、波の進行方向に残差流が生成されるように粗度高さ 0.9 cm の 1/4 円柱型の非対称構造物 (粗度) を 1.8 cm 間隔で取り付けて製作した One Way Pipe (Fig. 1 上図) を設置して実験を行った。水深  $h = 30$  cm、波高  $H = 5$  cm として、周期を  $T = 0.6 \sim 2.0$  sec と変化させパイプに生じる残差流量を、超音波ドップラー流速計により流速を測定して調べた。残差流量は、パイプの前面に設けた 10 測点の残差流速を積分することによって算出した。

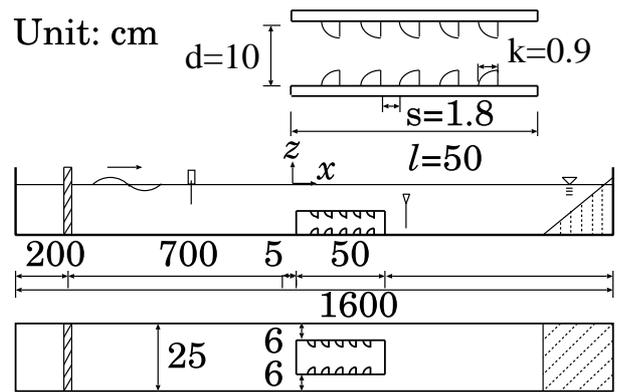


Fig. 1. 実験装置

続いて、この実験結果を計算によって再現するべく、One Way Pipe の残差流量  $Q$  を管路の基礎式である式 (1) を用いて計算した。圧力項には波による圧力差を与え、管内平均流速  $u$  を Runge-Kutta 法により求め、一周期間平均して残差流速  $\bar{u}$  とし、管径  $d$  を乗じることにより  $Q = d\bar{u}$  とした。

$$l \frac{du}{dt} + \zeta \frac{u|u|}{2} - \frac{\Delta p}{\rho} = 0, \quad \zeta = \zeta_e + \zeta_o + f \frac{l}{d}. \tag{1}$$

ここに、 $\rho$ : 流体密度、 $\Delta p = p_0 - p_l$ : 管端の圧力差、 $\zeta_e (= 0.5)$ : 入口損失係数、 $\zeta_o (= 1.0)$ : 出口損失係数、 $f$ : 摩擦損失係数である。One Way Pipe には、流体に及ぼす抵抗力が流れの向きによって異なるという特性があるので、この性質を流れの方向によって  $f$  を変化させることにより実現した。以後、Fig.1 に示す座標系で、 $u$  が正のときは  $f = f_p$ 、負のときは  $f = f_m$  とする。また、式 (1) において  $\Delta p$  を正確に与えられれば理想的であるが、今回は近似として微小振幅波理論における圧力を用いて管内の流速を計算することにした。さらに、実際の管路には高さがあるため、計算使用する  $\Delta p$  は底面  $z = -h$  から  $z = -(h - d)$  まで積分しこれを平均した、パイプ区間の平均圧力である式 (2) を用いた。

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho g H \frac{\sinh(kd)}{kd \cosh(kh)} \{ \cos(\omega t) - \cos(\omega t - kl) \}. \tag{2}$$

ここに、 $k$ : 波数、 $\omega$ : 角周波数である。

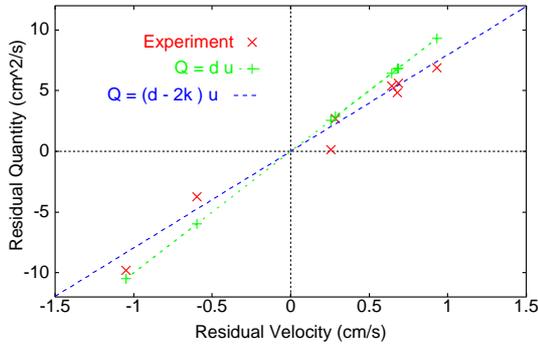


Fig. 2.  $\bar{u}$  と  $Q$  の関係 ( $z = -26$  cm)

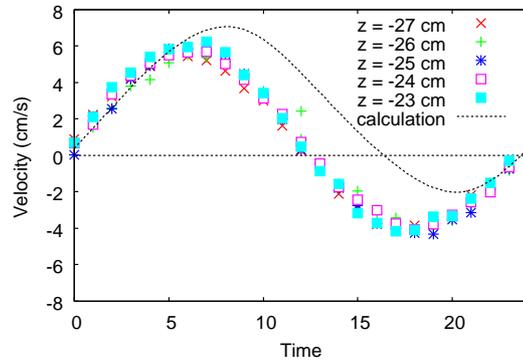


Fig. 3. 流速  $u$  の計算値と実験値 ( $T = 1.2$  sec)

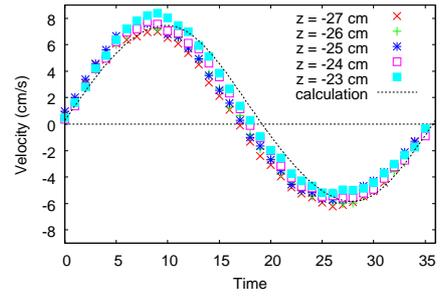
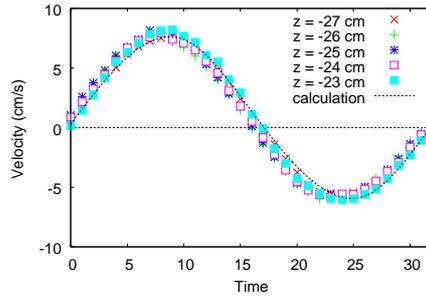
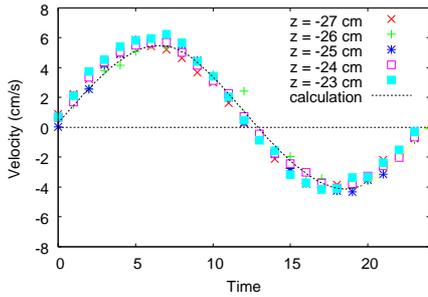


Fig. 4.  $u$  の計算値と実験値 ( $T = 1.2$  sec) Fig. 5.  $u$  の計算値と実験値 ( $T = 1.6$  sec) Fig. 6.  $u$  の計算値と実験値 ( $T = 1.8$  sec)

### 3. 結果と考察

まず、実験により求められた  $Q$  は、 $T$  によらず  $z = -26$  cm 地点の  $\bar{u}$  と非常に相関が高く、この地点の残差流速と、管径から粗度の高さを引いた  $d^* = d - 2k$  を使えば  $Q = d^* \bar{u}$  の関係で精度よく計算できることがわかった (Fig. 2)。したがって、この水深での流速および残差流速をうまく計算できれば、One Way Pipe の残差流量をうまく近似できることになる。よって、この地点の  $u$  を精度よく求めることが新たな目的となる。

Fig.3 には、 $z = -26$  cm における実験の位相平均流速波形と、定常流の実験結果<sup>2)</sup> から  $f_p \approx 0.3$ 、 $f_m \approx 0.8$  として式 (1) を計算した結果の一例を示す。グラフの横軸は  $1 = 1/20$  sec である。実験値との一致はそれほどよくないが、これは参考にした  $f$  が定常流の値であるためと、Re 数のオーダーが今回の実験とは一桁違っていたためと考えられる。 $f$  の値を詳しく知ることが出来ればさらにより結果が得られると考えられる。

Fig.4~Fig.6 には、 $f_p = 0.3$  と固定して  $f_m$  をパラメータとして実験値に fitting を行った結果を示す。図に示した条件では、どれも  $f_m = 3.6$  になったことから、慣性力が無視できない場での One Way Pipe の摩擦損失係数はこの辺りに真値がある可能性がある。また、これらの結果は比較的よく一致しているが、周期が大きくなるにつれて誤差が大きくなる傾向が読み取れる。特に、流速がゼロになる  $T/2$  付近でのずれが大きく、残差流量を計算する場合には無視できない誤差となる。この  $T$  が大きな場合の流速波形は、基本周期の三角関数だけでは表現出来ないこと、一般に式 (1) の形の微分方程式が倍周期の解をあまり持たないことを併せて考えると、式 (2) で与えた圧力変動に問題があると言える。実際、実験でも長周期波の非線型性が確認されているので、この補正を行えばさらに正確な結果を得ることが出来ると考えられる。

### 4. 結論

波浪場の One Way Pipe が生成する残差流量を式 (1) を用いて計算すれば、精度よく評価できる可能性がある。また、One Way Pipe によって生成される残差流量は管径の 4 割程度の地点の残差流速と相関が高く、 $Q = d^* \bar{u}$  の関係を用いればうまく計算ができることがわかった。さらに、波の周期が長い場合に与える圧力差は、非線型効果を考慮したほうが、精度のよい結果が得られることもわかった。摩擦損失係数のについては今後さらに検討を重ねていきたい。

### 参考文献

- 1) 山本ら：志賀島漁港外港の導水工による環境改善効果に関する現地調査，海岸工学論文集第 41 巻，1994 年，p1096-p1100
- 2) 朴ら：方向特性を有する管路の海水交換促進効果の検討，水工学論文集 第 47 巻，2003 年，p859-p864